

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

| | | |
|--|----|---|
| (51) Internationale Patentklassifikation ⁷ : G01B 11/24 | A1 | (11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/66973 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 9. November 2000 (09.11.00) |
| (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP00/03706 (22) Internationales Anmeldedatum: 26. April 2000 (26.04.00) (30) Prioritätsdaten: 199 19 963.9 30. April 1999 (30.04.99) DE (71)(72) Anmelder und Erfinder: WAGNER, Christoph [DE/DE]; Spardorfer Strasse 15, D-91054 Erlangen (DE). (74) Anwälte: GLEISS, Alf-Olav usw.; Maybachstrasse 6A, D-70469 Stuttgart (DE). | | (81) Bestimmungsstaaten: CA, IL, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i> |

(54) Title: METHOD FOR OPTICALLY DETECTING THE SHAPE OF OBJECTS

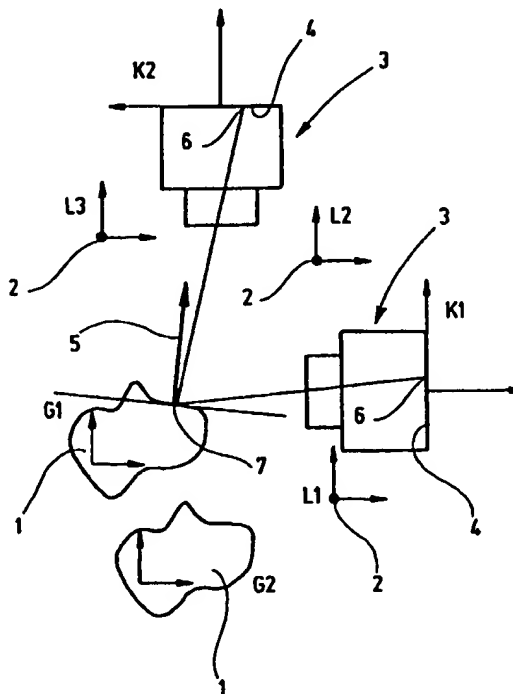
(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR OPTISCHEN FORMERFASSUNG VON GEGENSTÄNDEN

(57) Abstract

The invention relates to a method for optically detecting the shape of at least one three-dimensional object (1), comprising the steps: a) Positioning the object (1), at least one light source (2) and at least one camera (3) in several positions in the room; b) Detecting each position of the object (Gi), the light source (Li) and the camera (Ki); c) Illuminating the object (1) in the positions (Gi, Li, Ki) using the light source (2); d) Recording images (4) of the object (1) in the positions (Gi, Li, Ki); e) Determining the normal lines (5) on the surface of the object (1) from the positions (Gi, Li, Ki) and the images (4); f) Allocation of corresponding image points (6) in the images (4), using the normal lines (5) on the surface; g) Determining the three-dimensional shape of the object (1) from the positions (Gi, Li, Ki), from the normal lines (5) on the surface and from the corresponding image points (6).

(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur optischen Formerfassung mindestens eines dreidimensionalen Gegenstandes (1) mit den Schritten: a) Positionieren des Gegenstandes (1), mindestens einer Lichtquelle (2) und mindestens einer Kamera (3) im Raum in mehreren Stellungen; b) Erfassen der jeweiligen Stellung des Gegenstandes (Gi), der Lichtquelle (Li) und der Kamera (Ki); c) Beleuchten des Gegenstandes (1) durch die Lichtquelle (2) in den Stellungen (Gi, Li, Ki); d) Aufnehmen von Bildern (4) des Gegenstandes (1) in den Stellungen (Gi, Li, Ki); e) Ermitteln der Oberflächennormalen (5) des Gegenstandes (1) aus den Stellungen (Gi, Li, Ki) und den Bildern (4); f) Zuordnung korrespondierender Bildpunkte (6) in den Bildern (4) mit Hilfe der Oberflächennormale (5); g) Ermitteln der dreidimensionalen Form des Gegenstandes (1) aus den Stellungen (Gi, Li, Ki), der Oberflächennormale (5) und von korrespondierenden Bildpunkten (6).



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

| | | | | | | | |
|----|------------------------------|----|--------------------------------------|----|--|----|-----------------------------------|
| AL | Albanien | ES | Spanien | LS | Lesotho | SI | Slowenien |
| AM | Armenien | FI | Finnland | LT | Litauen | SK | Slowakei |
| AT | Österreich | FR | Frankreich | LU | Luxemburg | SN | Senegal |
| AU | Australien | GA | Gabun | LV | Lettland | SZ | Swasiland |
| AZ | Aserbaidschan | GB | Vereinigtes Königreich | MC | Monaco | TD | Tschad |
| BA | Bosnien-Herzegowina | GE | Georgien | MD | Republik Moldau | TG | Togo |
| BB | Barbados | GH | Ghana | MG | Madagaskar | TJ | Tadschikistan |
| BE | Belgien | GN | Guinea | MK | Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien | TM | Turkmenistan |
| BF | Burkina Faso | GR | Griechenland | ML | Mali | TR | Türkei |
| BG | Bulgarien | HU | Ungarn | MN | Mongolei | TT | Trinidad und Tobago |
| BJ | Benin | IE | Irland | MR | Mauretanien | UA | Ukraine |
| BR | Brasilien | IL | Israel | MW | Malawi | UG | Uganda |
| BY | Belarus | IS | Island | MX | Mexiko | US | Vereinigte Staaten von Amerika |
| CA | Kanada | IT | Italien | NE | Niger | UZ | Usbekistan |
| CF | Zentralafrikanische Republik | JP | Japan | NL | Niederlande | VN | Vietnam |
| CG | Kongo | KE | Kenia | NO | Norwegen | YU | Jugoslawien |
| CH | Schweiz | KG | Kirgisistan | NZ | Neuseeland | ZW | Zimbabwe |
| CI | Côte d'Ivoire | KP | Demokratische Volksrepublik Korea | PL | Polen | | |
| CM | Kamerun | KR | Republik Korea | PT | Portugal | | |
| CN | China | KZ | Kasachstan | RO | Rumänien | | |
| CU | Kuba | LC | St. Lucia | RU | Russische Föderation | | |
| CZ | Tschechische Republik | LI | Liechtenstein | SD | Sudan | | |
| DE | Deutschland | LK | Sri Lanka | SE | Schweden | | |
| DK | Dänemark | LR | Liberia | SG | Singapur | | |
| EE | Estland | | | | | | |

Verfahren zur optischen Formerfassung von Gegenständen

5 Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein optisches Stereoverfahren zur Formerfassung von dreidimensionalen Gegenständen.

10

In vielen Bereichen der industriellen Produktion und im Bereich von Multimedia-Anwendungen werden heute Verfahren benötigt, um geometrische, dreidimensionale Daten eines Gegenstandes mit Hilfe von
15 geeigneten Messeinrichtungen in numerische Daten auf einem Computer zu wandeln. Dies kann zum Zweck der Qualitätskontrolle oder auch mit dem Ziel erfolgen, diese Gegenstände einem menschlichen Beobachter realistisch dreidimensional darzubieten. Es
20 besteht außerdem großes Interesse, Objekte automatisiert zu erfassen und im Internet zu übertragen und zu visualisieren.

Optische Verfahren zur Formerfassung von Objekten
25 lösen immer mehr die bisher verwendeten mechanisch abtastenden Verfahren ab. Ein großer Vorteil der optischen Verfahren besteht darin, dass die Messung berührungslos und damit ohne mechanische Beeinflus-

sung des Objektes abläuft. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass eine große Anzahl von Gegenstandspunkten gleichzeitig erfasst werden kann, was zur einer Verkürzung der Messzeit führt.

5

Bekannte Formerfassungsverfahren basieren meist auf dem Triangulationsprinzip, dem Stereoprinzip oder auf interferometrischen Techniken.

- 10 Bei einem bekannten Triangulationsverfahren wird ein Lichtpunkt auf die Oberfläche des zu vermessen-
den Objektes projiziert und aus einer von der Be-
leuchtungsrichtung abweichenden Richtung beobach-
tet. Die Koordinaten des beleuchteten Punktes kön-
15 nen aus der Kenntnis der Orientierung des Projektionsstrahls im Raum und der Richtung, aus der der beobachtete Punkt wahrgenommen wird, berechnet werden. Das Verfahren ist zwar genau und eindeutig, da die Oberfläche des zu vermessenden Gegenstandes a-
20 ber Punkt für Punkt abgetastet werden muss, ist es langsam. Außerdem können nur solche Punkte der Oberfläche erfasst werden, die sowohl vom Ort der Lichtquelle als auch einer beobachtenden Kamera direkt sichtbar sind. Ein durch eine solche Messung
25 erhaltener Datensatz ist daher niemals vollständig. Zwar können mehrere Datensätze durch wiederholte Messungen mit unterschiedlichen Beobachtungs- beziehungsweise Beleuchtungsperspektiven gewonnen

werden, um aber die Form des Gegenstandes in seiner Gesamtheit zu erfassen, müssen diese Datensätze jedoch in eine geometrische Beziehung zueinander gestellt werden (Matching), wofür häufig noch der
5 Eingriff eines menschlichen Benutzers erforderlich ist. Darüber hinaus treten beim Matching auch die Nahtstellen der Datensätze unangenehm in Erscheinung, da die einzelnen Datensätze selten perfekt zur Deckung miteinander gebracht werden können. Als
10 Artefakte können Kanten und Sprünge entstehen, die nicht nur die Genauigkeit der Daten beeinträchtigen, sondern vor allem auch für einen Betrachter visuell störend auffallen. Das menschliche Auge ist in der Lage, bereits geringste Erhebungen und Ein-
15 buchtungen in der Oberfläche eines visualisierten oder realen Gegenstandes zu erkennen. Neben der Lage eines Punktes im Raum kann der Mensch auch die Neigung der Oberfläche aus den Beleuchtungsverhältnissen erschließen. Geringe Variationen des Ortes
20 können bereits eine große Veränderung der Neigung hervorrufen, wodurch auch kleinste Unregelmäßigkeiten einem menschlichen Beobachter auffallen. Dies ist im übrigen ein grundsätzliches Problem der
meisten Verfahren zur dreidimensionalen Formerfassung. Die Aufnahme von Messdaten ist in den meisten
25 Fällen nicht an diesen Umstand angepasst, so dass schon ein geringes Rauschen der Daten sehr störend

für den Betrachter wirkt. Dies gilt auch für die im folgenden beschriebenen bekannten Verfahren.

Weiterentwickelte, auf der Triangulation beruhende
5 Verfahren, sind die Lichtschnitttechnik und die
Streifenprojektion. Bei ersterer wird anstatt eines
einzelnen Punktes eine Linie auf die Oberfläche des
zu vermessenden Gegenstandes projiziert. Diese Li-
nie wird aus einer von der Beleuchtungsrichtung ab-
10 weichenden Richtung beobachtet. Die Raumkoordinaten
der beleuchteten Punkte werden in gleicher Weise
wie oben erwähnt gewonnen. Dieses Verfahren ist
zwar schneller als die punktweise Triangulation,
aber immer noch langsamer als andere Verfahren, die
15 eine ganze Fläche auf einmal erfassen können. Auch
hier sind mehrere Messungen unter verschiedenen
Perspektiven und deren Matching nötig, um zu einer
vollständigen Darstellung des Gegenstands zu gelan-
gen.

20

Bei der Streifenprojektion handelt es sich um eine
Weiterentwicklung der Lichtschnitttechnik, bei der
mehrere Linien gleichzeitig auf die Oberfläche des
zu vermessenden Gegenstandes projiziert werden. Die
25 Intensität dieser Linien variiert periodisch in la-
teraler Richtung und macht die einzelnen Linien für
die Beobachtungskamera unterscheidbar. Das Verfah-
ren ist zwar schnell, aber auch hier ist es nötig,

mehrere Messungen durch Matching zusammenzufügen, so dass auch hier die vorstehend erwähnten Kanten und Sprünge entstehen können.

- 5 Für hochgenaue Messungen werden häufig interferometrische Verfahren eingesetzt. Auch bei ihnen besteht das Problem, dass die Ergebnisse mehrerer Einzelmessungen zusammengefügt werden müssen, um zu einer vollständigen dreidimensionalen Darstellung
10 des Messgegenstandes zu kommen. Darüber hinaus sind diese Verfahren sehr empfindlich gegenüber kleinsten Erschütterungen und können meist nur im Laborbetrieb genutzt werden.
- 15 Eine weitere Gruppe von Verfahren beruht auf dem Stereoprinzip. Dabei macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass zwei Ansichten eines Gegenstandes, die unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen wurden, Information über die dreidimensionale Gestalt
20 enthalten. Man spricht hier von einem binokularen Stereoverfahren. Mit Hilfe von Softwarealgorithmen werden korrespondierende Merkmale des Objektes in den beiden Aufnahmen identifiziert. Die unterschiedliche Lage des Merkmals in den beiden Bildern
25 stellt ein Maß für die Tiefe des Merkmals im dreidimensionalen Raum dar. Die Hauptaufgabe beim binokularen Stereo ist es, die Korrespondenz von Merkmalen zu ermitteln. Eine Methode besteht darin,

kleine Bildausschnitte miteinander zu vergleichen auf der Grundlage deren Helligkeitsstruktur. Dabei treten zwei Schwierigkeiten auf. Haben Bildaus-
schnitte keine markanten Helligkeitsstrukturen,
5 können sie nicht einander zugeordnet werden. Dies bedeutet, dass die räumliche Tiefe von Objektpunkten nur in strukturierten Bereichen des Objektes ermittelt werden kann. Darüber hinaus ist die Helligkeit, genauer Leuchtdichte, eines Objektes nicht
10 gleich für unterschiedliche Blickwinkel. Das kann ebenfalls dazu führen, dass keine Tiefe ermittelt werden kann.

Das binokulare Stereoprinzip kann von zwei Ansichten
15 ten auf mehrere Ansichten erweitert werden. Dies liefert weitere Information und macht die Korrespondenzanalyse zuverlässiger, in vielen Fällen jedoch noch nicht ausreichend.

20 Eine weitere Gruppe von Stereoverfahren nutzt unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen, um die Form von Gegenständen zu ermitteln. Anders als beim binokularen Stereo bleibt der Blickwinkel fest und die Beleuchtungsrichtung ändert sich. Man spricht
25 daher von einem photometrischen Stereoverfahren. Aus den Helligkeiten unter den einzelnen Beleuchtungsrichtungen kann man auf die Neigung der Objektoberfläche schließen. Man misst in diesem Fall

also nicht die räumliche Tiefe, sondern eine Größe, die deren Ableitung bildet. Photometrische Stereoverfahren sind gut geeignet, lokale Objektstrukturen zu messen, globale Strukturmessungen sind allerdings mit Fehlern behaftet. Eine globale Objektstruktur lässt sich besser mit einem Verfahren bestimmen, das die räumliche Tiefe selbst misst, beispielsweise also einem binokularen Stereoverfahren.

10

Die vorstehend erwähnten Verfahren weisen somit den Nachteil auf, dass nicht in allen Fällen zusammengehörige Bildpunkte auf unterschiedlichen Bildern eindeutig einander zugeordnet werden können. Man spricht dabei von dem Korrespondenzproblem.

15

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur optischen Formerfassung anzugeben, bei dem das Korrespondenzproblem zumindest weitestgehend vermieden ist.

20

Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Verfahren, das die in Anspruch 1 genannten Merkmale aufweist. Mit diesem Verfahren können sowohl globale als auch die lokale Objektstrukturen genau erfasst werden. Diese beiden Prinzipien sind übrigens auch beim menschlichen Gesichtssinn in starkem Maß beteiligt, um die Gestalt eines Gegenstandes zu erfassen. Deshalb

25

- 8 -

sind Messungen möglich, die nicht nur unter metrischen, sondern auch unter visuellen Aspekten der Wirklichkeit äußerst nahe kommen.

- 5 Für die Korrespondenzanalyse beim erfindungsgemäßen Verfahren müssen also nicht Helligkeitswerte benutzt werden, sondern man kann auf Neigungswerte zurückgreifen. Neigungswerte sind anders als Helligkeitswerte nämlich invariant gegenüber der
- 10 Blickrichtung. Das Korrespondenzproblem wird mithin beim erfindungsgemäßen Verfahren insbesondere dadurch gelöst, dass die Oberflächennormale eines Flächenpunkts am Gegenstand aus verschiedenen Blickrichtungen ermittelt wird. Bildpunkte mit denselben
- 15 Flächennormalen sind somit leicht und schnell einander eindeutig zuordenbar.

Darüber hinaus ist für das vorgeschlagene Verfahren keine explizite Matching-Prozedur nötig. Dadurch

20 werden Artefakte an den Nahtstellen von Einzelaufnahmen vermieden.

Das vorgeschlagene erfindungsgemäße Verfahren umfasst folgende Schritte:

- 25 a) Positionieren des Gegenstandes 1, mindestens einer Lichtquelle 2 und mindestens einer Kamera 3 im Raum in mehreren Stellungen,

- b) Erfassen der jeweiligen Stellung des Gegenstandes Gi, der Lichtquelle Li und der Kamera Ki,
- c) Beleuchten des Gegenstandes 1 durch die Lichtquelle 2 in den Stellungen Gi, Li, Ki,
- 5 d) Aufnehmen von Bildern 4 des Gegenstandes 1 in den Stellungen Gi, Li, Ki,
- e) Ermitteln der Oberflächennormalen 5 des Gegenstandes 1 aus den Stellungen Gi, Li, Ki und den Bildern 4,
- 10 f) Zuordnung korrespondierender Bildpunkte 6 in den Bildern 4 mit Hilfe der Oberflächennormale 5,
- g) Ermitteln der dreidimensionalen Form des Gegenstandes aus den Stellungen Gi, Li, Ki, der Oberflächennormale 5 und von korrespondierenden Bildpunk-
- 15 ten 6.

Weitere Ausgestaltungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

- 20 Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen mit Bezug auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 schematisch eine Vorrichtung zur optischen Formerfassung von Gegenständen und

25

Figur 2 eine tragbare Vorrichtung zur optischen Formerfassung von Gegenständen.

Ein zu vermessender dreidimensionaler Gegenstand 1 wird in die Stellungen G1, G2, ...Gi, zumindest eine Lichtquelle 2 in die Stellungen L1, L2, L3, 5 ...Li und die Kamera 3 in die Stellungen K1, K2, ...Ki gebracht (siehe Figur 1). Dies kann durch zumindest eine Verlagerungsvorrichtung erfolgen, z.B. eine Verschiebeeinheit, ein Förderband, einen Drehtisch oder einen an sich bekannten Roboter. Diese 10 Option ist sehr gut geeignet für automatisierte Messvorgänge an einer Vielzahl von gleichartigen Gegenständen 1. Ebenso ist es möglich, dass ein Benutzer Gegenstand 1, Lichtquelle 2 und Kamera 3 nach Belieben frei im Raum positioniert. Tragbare, 15 handgeführte Formerfassungssysteme sind von großem Interesse, wenn es um die Vermessung von Einzelobjekten geht, die große Flexibilität erfordern. Ebenso sind Kombinationen aus mechanischer Führung und freier Handhabung denkbar. So kann z.B. eine 20 Lichtquelle 2 starr an der Kamera 3 montiert sein (Spezialfall der mechanischen Führung), die Einheit aus Kamera 3 und Lichtquelle 2 aber frei beweglich sein. Auch ist es denkbar, mehrere fest montierte Lichtquellen 2 zu verwenden, die nacheinander be- 25 nutzt werden, was dem Positionieren einer einzelnen Lichtquelle 2 in verschiedenen Stellungen gleichkommt. Analog dazu können auch mehrere Kameras 3 verwendet werden, was dem Positionieren einer ein-

zigen Kamera 3 in verschiedenen Stellungen entspricht. Ebenso können mehrere Gegenstände 1 einbezogen werden.

5 Für den weiteren Ablauf der Messung ist es von Bedeutung, die Stellung des Gegenstandes 1 (Gi), der Lichtquelle 2 (Li) und der Kamera 3 (Ki) zu kennen. Einerseits kann die Stellung Gi, Li bzw. Ki implizit gegeben sein. Liegt eine mechanische Führung
10 vor, so ist die Lage beziehungsweise Stellung Gi, Li und Ki nämlich durch die Geometrie der Führung gegeben. Am Beispiel einer computergesteuerten Verschiebeeinheit (nicht dargestellt) ist leicht zu erkennen, dass die Stellung der Ansteuereinheit be-
15 kannt ist und von dieser übernommen werden kann. Bei ortsfester Montage des Gegenstandes 1, der Lichtquelle 2 oder der Kamera 3 kann die Lage einmal bestimmt und für alle weiteren Messungen übernommen werden. Andererseits kann Gi, Li und Ki
20 durch explizite Messung bestimmt werden. Dieser Fall ist besonders für handgeführte Messeinrichtungen zu betrachten. Dies kann durch einen zusätzlichen Sensor S erfolgen, der die Stellung Gi, Li bzw. Ki verfolgt. Solche Sensoren S werden indus-
25 triell hergestellt und arbeiten beispielsweise nach photogrammetrischen, trägheitsbasierten, Ultraschall- oder auch magnetischen Prinzipien. Das Prinzip der Messung soll am Beispiel eines magne-

tisch arbeitenden Sensors S (Figur 2) näher beschrieben werden. Das Magnetsensorsystem besteht aus einem ortsfest montierten Sender SE und vorzugsweise mehreren Empfängern E, die am Gegenstand 1, der Lichtquelle 2 bzw. der Kamera 3 befestigt werden können. Dem Sender SE und den Empfängern E kann jeweils ein eigenes kartesisches Koordinatensystem zugeordnet werden. Die Lage G_i des Gegenstandes 1 ist nun gegeben durch die Beziehung zwischen Senderkoordinatensystem und Empfängerkoordinatensystem des Gegenstandes 1. Entsprechendes gilt für Lichtquelle 2 und Kamera 3. Die Beziehung zweier Koordinatensysteme zueinander kann beschrieben werden durch eine Koordinatentransformation. Für das Positionieren von starren Körpern im Raum besitzt diese Koordinatentransformation genau sechs Freiheitsgrade, drei für die Verschiebung in den drei Raumrichtungen und weitere drei für die Drehung im Raum. Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, eine Verschiebung und Drehung anzugeben. Die Verschiebung kann durch einen Vektor mit drei Dimensionen gegeben sein, die Drehung durch die Angabe dreier sogenannter „Eulerwinkel“. Andere Darstellungen der Drehung sind möglich, wie z.B. die Angabe von sog. „Quaternionen“.

Eine weitere Form der Darstellung beruht auf der Matrizen Schreibweise. Hier kann man die sogenannte

„Drehmatrix“ angeben. Lagesensoren mit sechs Freiheitsgraden liefern als Messwert die Koordinatentransformation meist in Form einer Translation und Drehung in einer der oben genannten oder davon abgeleiteten Darstellungen. Dieses Gebiet soll nicht weiter vertieft werden, es soll nur deutlich werden, dass alle benötigten Messwerte zur Verfügung gestellt werden können.

Die Lichtquelle 2, die den zu vermessenden Gegenstand 1 ausleuchtet, wird vorzugsweise nahezu punktförmig gewählt. Dies bietet den Vorteil, dass das nachfolgend beschriebene photometrische Stereoverfahren einfach durchzuführen ist. Als Lichtquelle denkbar sind z.B. Blitzlampen, Halogenlampen, externe Lichtquellen 2 mit Glasfasern oder Leuchtdioden großer Leistung.

Als Kamera 3 wird vorzugsweise eine elektronisch arbeitende Kamera 3 verwendet, deren Bilder 4 auf einfache Weise von einem an sich bekannten Computer aufgenommen und weiterverarbeitet werden können. Vorzugsweise handelt es sich um eine digitale Kamera 3. Für ausgewählte Kombinationen von Stellungen G_i , L_i und K_i wird jeweils ein einzelnes Bild 4 aufgenommen. Aus den bekannten Stellungen G_i , L_i und K_i sowie den Bildern 4 wird anschließend die sogenannte „Oberflächennormale“ 5 eines Punktes 7

des Gegenstandes 1 bestimmt. Unter der Oberflächen-
normale 5 versteht man einen Vektor, der senkrecht
steht auf einem Flächenelement 7 der Oberfläche des
Gegenstands 1. Er ist ein gebräuchliches Maß für
5 die Lage, Orientierung bzw. Neigung der Oberfläche
im Raum. Es gibt eine Reihe von Methoden, die er-
folgreich eingesetzt werden, um die Neigung von O-
berflächen auf optischem Weg zu ermitteln. Eine
grundlegende Methode, die „photometrisches Stereo-
10 verfahren“ genannt wird, kann für das beschriebene
Verfahren eingesetzt werden. Beim photometrischen
Stereo bleiben sowohl Kamera 3 als auch Gegenstand
1 zunächst am selben Ort, während eine Lichtquelle
2 verschiedene Stellungen im Raum einnimmt. In je-
15 der dieser Stellungen wird ein Bild 4 aufgenommen.
In vielen Fällen ist es günstig, genau drei Stel-
lungen der Lichtquelle 2 zu wählen, da hiermit die
Oberflächennormale 5 eindeutig bestimmt ist. Zum
Bestimmen von drei Unbekannten, nämlich den drei
20 Komponenten des Normalenvektors, sind genau drei
Beleuchtungsrichtungen notwendig. Vorzugsweise wird
man nicht eine Lichtquelle 2 in drei Stellungen
bringen, sondern wird drei verschiedene Lichtquel-
len 2 verwenden und jeweils mit einer von Ihnen den
25 Gegenstand 1 beleuchten. Vorzugsweise sind die drei
Lichtquellen 2 fest an der Kamera 3 montiert (siehe
Figur 2). Nun werden die in den Bilder 4 festgehal-
tenen Lichtintensitäten und die Stellungen G_i , L_i

und K_i so verknüpft, dass man als Ergebnis die Oberflächennormale 5 des Flächenpunktes 7 des Gegenstandes erhält. Dabei legt man ein Modell des Gegenstandes 1 für seine Abstrahlcharakteristik des einfallenden Lichts zugrunde. Ein grundlegendes Modell der Abstrahlcharakteristik ist der sogenannte „Lambertstrahler“. Ein Lambertstrahler sendet einfallendes Licht gleichförmig in alle Raumrichtungen aus. Dieses Modell gilt in guter Näherung für diffus reflektierende Objekte. Besonders einfache Verhältnisse liegen vor, wenn man punktförmige Lichtquellen 2 verwendet. Flächige Lichtquellen sind auch möglich und können als Zusammenwirken einer Vielzahl von Punktlichtquellen betrachtet werden.

Bei Objekten mit einem Anteil an spiegelnder Reflexion sind verfeinerte Modelle entwickelt worden. Das photometrische Stereoverfahren wird für weitere Stellungen G_i und K_i wiederholt. Die mathematischen und physikalischen Hintergründe sollen hier nicht weiter vertieft werden, entscheidend ist, dass es möglich ist, die Oberflächennormale 5 eines Gegenstandes 1 mit Hilfe von photometrischen Stereoverfahren zu bestimmen.

Als nächstes wird die Methode des sogenannten „binokularen Stereoverfahrens“ angewandt. Das bedeutet, dass korrespondierende Bildpunkte 6 in den aufgenommenen Bildern 4 ermittelt werden. Daraus

kann man auf die Lage der den Bildpunkten 6 entsprechenden Gegenstandspunkte 7 im Raum schließen. Bisherige Verfahren stützen sich bei der Korrespondenzanalyse meist auf die in den Bildern 4 festgehaltene Lichtintensität. Man setzt dabei voraus, dass korrespondierende Punkte sich durch die gleiche Lichtintensität oder zumindest durch ähnliche Intensitätsmuster bemerkbar machen. Leider ist dies oft nur näherungsweise gegeben und schlägt deshalb häufig fehl. Man kann sagen, dass die Lichtintensität im allgemeinen nicht invariant ist gegenüber der Stellung der Kamera 3, selbst wenn die Lichtquelle 2 nicht bewegt wird. Ähnliches gilt für die Farbeigenschaften.

15

Ganz anders dagegen verhält es sich mit der Oberflächennormale 5 eines Gegenstandes 1. Sie ist invariant gegenüber der Stellung von Kamera 3 und Lichtquelle 2. Dies ist als ein Hauptvorteil des vorgeschlagenen erfindungsgemäßen Verfahrens zu nennen. Die Korrespondenzanalyse kann wesentlich zuverlässiger durchgeführt werden, da sie sich auf eine stellungsinvariante Größe stützt.

25 Aus der Korrespondenz von Bildpunkten 6 wird, wie bei binokularen Stereoverfahren üblich, mit Hilfe von geometrische Beziehungen und Kenntnissen von Kameraparametern auf die Lage der zugehörigen Punk-

te des Objektes im Raum geschlossen. Da im vorgeschlagenen Verfahren eine Vielzahl von Ansichten des Gegenstandes 1 eingehen kann, ist eine Erfassung der Gegenstandsform von weitgehend allen Seiten möglich. Im beschriebenen Stereoverfahren werden alle Ansichten zu einer einzigen dreidimensionalen Ansicht des Gegenstandes 1 vereinigt. Damit wird ein explizites Zusammenfügen von dreidimensionalen Teilbildern wie bei anderen Verfahren umgangen. Die Tatsache, dass eine solche explizite Matchingprozedur umgangen werden kann, ist als ein weiterer entscheidender Vorteil des beschriebenen Verfahrens zu nennen.

Weiter soll noch einmal betont werden, dass das menschliche Auge in der Lage ist, bereits geringste Erhebungen und Einbuchtungen in der Oberfläche eines visualisierten oder realen Gegenstandes zu erkennen. Neben der Lage eines Punktes im Raum kann der Mensch auch die Neigung der Oberfläche aus den Beleuchtungsverhältnissen erschließen. Die Neigung einer Fläche kann als eine Ableitung des Ortes verstanden werden. Geringe Variationen des Ortes können bereits eine große Veränderung der Neigung hervorrufen, wodurch auch kleinste Unregelmäßigkeiten einem menschlichen Beobachter auffallen. Dies ist ein grundsätzliches Problem der meisten Verfahren zur dreidimensionalen Formerfassung. Die Aufnahme

von Messdaten ist in den meisten Fällen nicht an diesen Umstand angepasst, so dass schon ein geringes Rauschen der Daten sehr störend für den Betrachter wirkt. Deshalb wird die bereits gewonnene Information der Oberflächennormale 5 neben der Korrespondenzanalyse auch zur einer Verbesserung der dreidimensionalen Messwerte herangezogen. Unvermeidliche Fehler bei der Messung des Ortes werden durch Kenntnis der Oberflächennormalen 5 korrigiert. Dabei werden hauptsächlich Messfehler der Lage von Objektpunkten eliminiert, die Krümmung an jedem Punkt der Oberfläche bleibt aber im wesentlichen erhalten. Damit ist eine drastische Verbesserung der Messgenauigkeit gegenüber binokular arbeitenden Stereoverfahren zu erwarten. Neben einer verbesserten metrischen Genauigkeit ist auch eine verbesserter visueller Eindruck zu erwarten, da der menschliche Gesichtssinn Variationen der Oberflächennormale von dreidimensionalen Objekten sehr genau bewerten kann. Das vorgeschlagenen Verfahren ist daher zugeschnitten auf die speziellen Gegebenheiten des menschlichen Sehens und ermöglicht eine besonders realistische dreidimensionale Visualisierung.

25

Im folgenden wird anhand von Figur 2 ein Beispiel einer handgeführten Vorrichtung V gegeben, die zur Umsetzung des Verfahrens geeignet ist. Neben einem

vorzugsweise magnetisch arbeitenden Lagesensor S und einer CCD-Kamera 3 umfasst die Vorrichtung V drei Lichtleitfasern F, die mit einer externen Lichtquelle verbunden sind (nicht gezeichnet). Die
5 Kamera 3, der Empfänger E des Lagesensors S und die Faserenden F, die somit die Lichtquellen 2 bilden, sind an einer Tragplatte M befestigt, die tragbar ausgebildet sein kann und hierfür vorzugsweise Handgriffe H aufweist. Die Tragplatte M kann auch
10 automatisch bewegt beziehungsweise verlagert werden. Die von der Kamera 3 aufgezeichneten Bilder und die Signale des Lagesensors S werden einer Auswerteeinrichtung A zugeführt und ausgewertet. Diese ist vorzugsweise als Computer ausgebildet, auf dem
15 die Bestimmung der Oberflächennormalen 5 durchgeführt wird, wie dies vorstehend beschrieben ist. Figur 2 zeigt somit eine Vorrichtung V zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur optischen Formerfassung.

Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zur optischen Formerfassung mindestens eines dreidimensionalen Gegenstandes (1) mit den Schritten:
- a) Positionieren des Gegenstandes (1), mindestens einer Lichtquelle (2) und mindestens einer Kamera
- 10 (3) im Raum in mehreren Stellungen,
- b) Erfassen der jeweiligen Stellung des Gegenstandes (Gi), der Lichtquelle (Li) und der Kamera (Ki),
- c) Beleuchten des Gegenstandes (1) durch die Lichtquelle (2) in den Stellungen (Gi, Li, Ki),
- 15 d) Aufnehmen von Bildern (4) des Gegenstandes (1) in den Stellungen (Gi, Li, Ki),
- e) Ermitteln der Oberflächennormalen (5) des Gegenstandes (1) aus den Stellungen (Gi, Li, Ki) und den Bildern (4),
- 20 f) Zuordnung korrespondierender Bildpunkte (6) in den Bildern (4) mit Hilfe der Oberflächennormale (5),
- g) Ermitteln der dreidimensionalen Form des Gegenstandes aus den Stellungen (Gi, Li, Ki), der Oberflächennormale (5) und von korrespondierenden Bild-
- 25 punkten (6).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Gegenstand (1), die Lichtquelle (2) oder die Kamera (3) von Hand geführt wird.
- 5 3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Gegenstand (1), die Lichtquelle (2) oder die Kamera (3) durch eine mechanische Vorrichtung geführt wird.
- 10 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Stellung von Gegenstand (Gi), Lichtquelle (Li) oder Kamera (Ki) mit Hilfe eines zusätzlich Sensors (S) erfasst wird.
- 15 5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Stellung mit Hilfe eines photogrammetrischen, eines trägheitsbasierten, Ultraschall- oder magnetisch arbeitenden Sensors (S) ermittelt
- 20 wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens drei Lichtquellen (2) verwendet werden.
- 25 7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtquellen (2) fest an der Kamera (3) montiert sind.

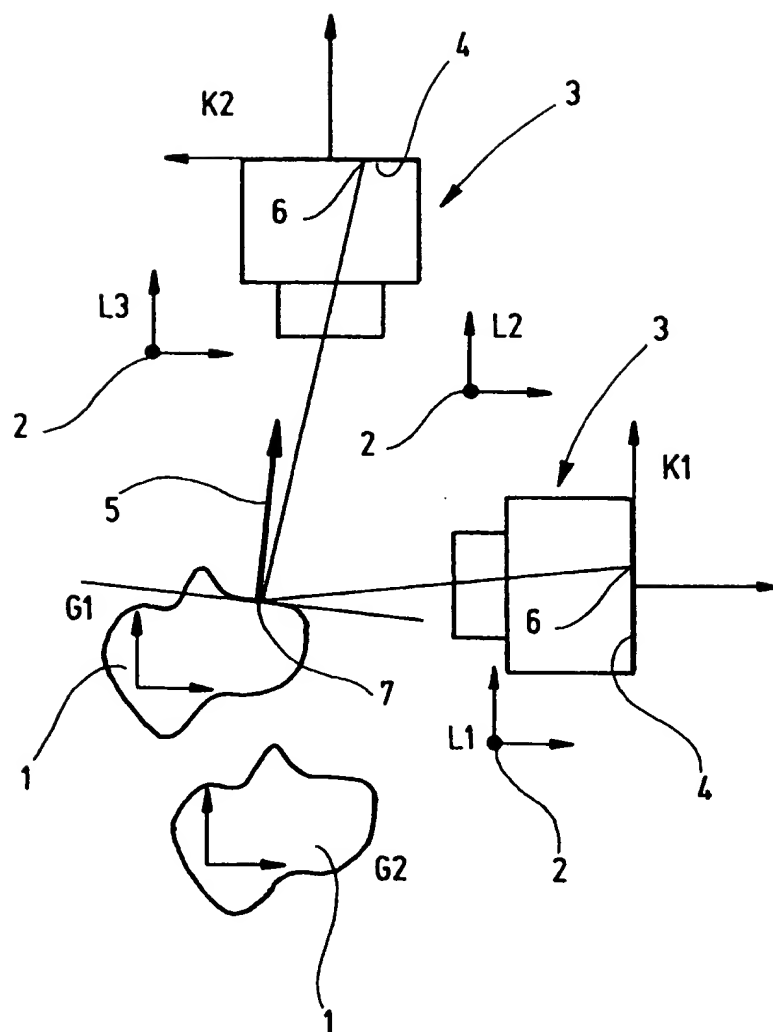


Fig.1

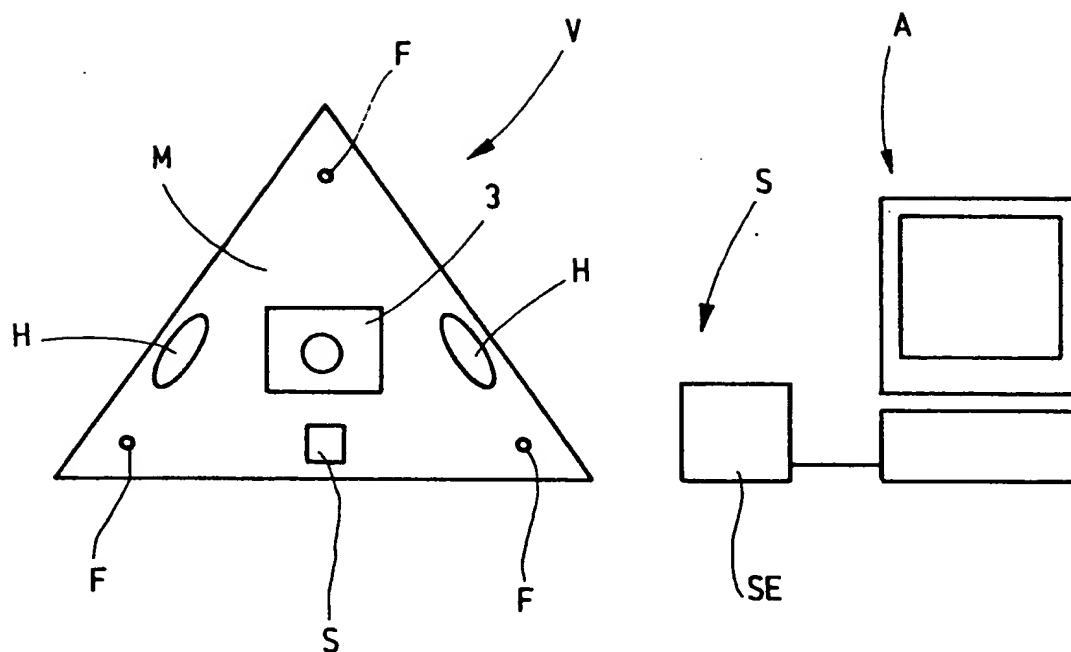


Fig.2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/EP 00/03706

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01B11/24

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|------------|--|-----------------------|
| Y | US 4 791 482 A (BARRY ROBERT F ET AL) 13 December 1988 (1988-12-13) abstract; figures 1-3 | 1-4,6,7 |
| Y | WO 97 05449 A (CRAMPTON STEPHEN J) 13 February 1997 (1997-02-13) abstract page 10 -page 11; figures 1,2,3A,4 page 20 | 1-4,6,7 |
| Y | GB 2 328 280 A (TRICORDER TECHNOLOGY PLC) 17 February 1999 (1999-02-17) abstract; figures 8,9 page 1, line 6 - line 7 | 2 |
| Y | US 3 840 739 A (COULTER A) 8 October 1974 (1974-10-08) abstract; figure 3 | 6,7 |



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 July 2000

Date of mailing of the international search report

28/07/2000

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Vorropoulos, G

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/EP 00/03706

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| US 4791482 A | 13-12-1988 | WO 8805904 A | 11-08-1988 |
| WO 9705449 A | 13-02-1997 | AU 6626896 A | 26-02-1997 |
| | | EP 0840880 A | 13-05-1998 |
| | | JP 11509928 T | 31-08-1999 |
| GB 2328280 A | 17-02-1999 | AU 8636298 A | 22-02-1999 |
| | | EP 1000318 A | 17-05-2000 |
| | | WO 9906950 A | 11-02-1999 |
| US 3840739 A | 08-10-1974 | DE 2434369 A | 06-03-1975 |
| | | FR 2239669 A | 28-02-1975 |
| | | GB 1463600 A | 02-02-1977 |
| | | JP 1051165 C | 26-06-1981 |
| | | JP 50046151 A | 24-04-1975 |
| | | JP 55042417 B | 30-10-1980 |

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/03706

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 G01B11/24

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G01B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|------------|--|--------------------|
| Y | US 4 791 482 A (BARRY ROBERT F ET AL) 13. Dezember 1988 (1988-12-13) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 | 1-4, 6, 7 |
| Y | WO 97 05449 A (CRAMPTON STEPHEN J) 13. Februar 1997 (1997-02-13) Zusammenfassung Seite 10 -Seite 11; Abbildungen 1,2,3A,4 Seite 20 | 1-4, 6, 7 |
| Y | GB 2 328 280 A (TRICORDER TECHNOLOGY PLC) 17. Februar 1999 (1999-02-17) Zusammenfassung; Abbildungen 8,9 Seite 1, Zeile 6 - Zeile 7 | 2 |
| Y | US 3 840 739 A (COULTER A) 8. Oktober 1974 (1974-10-08) Zusammenfassung; Abbildung 3 | 6, 7 |

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

20. Juli 2000

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

28/07/2000

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3018

Bevollmächtigter Bediensteter

Vorropoulos, G

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/03706

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| US 4791482 A | 13-12-1988 | WO 8805904 A | 11-08-1988 |
| WO 9705449 A | 13-02-1997 | AU 6626896 A | 26-02-1997 |
| | | EP 0840880 A | 13-05-1998 |
| | | JP 11509928 T | 31-08-1999 |
| GB 2328280 A | 17-02-1999 | AU 8636298 A | 22-02-1999 |
| | | EP 1000318 A | 17-05-2000 |
| | | WO 9906950 A | 11-02-1999 |
| US 3840739 A | 08-10-1974 | DE 2434369 A | 06-03-1975 |
| | | FR 2239669 A | 28-02-1975 |
| | | GB 1463600 A | 02-02-1977 |
| | | JP 1051165 C | 26-06-1981 |
| | | JP 50046151 A | 24-04-1975 |
| | | JP 55042417 B | 30-10-1980 |